

パルスレーザーホログラフィー法による噴霧粒径の 三次元計測システムの開発

Development of Three Dimensional Measurement System for Droplet Size Distribution
via Pulsed Laser Holography Method

山川 正尚, 西田 恵哉, 上川 将洋, 吉崎 拓男, 廣安 博之
(Masahisa Yamakawa) (Keiya Nishida) (Masahiro Kamikawa) (Takuo Yosizaki) (Hiroyuki Hiroyasu)
広島大学・院 広島大学 新潟鐵工所 広島大学 近畿大学
(Univ. of Hiroshima) (Univ. of Hiroshima) (Niigata Engineering) (Univ. of Hiroshima) (Kinki Univ.)

Three-dimensional measurement of the droplet size distribution in a fuel spray was performed using a pulsed laser holographic method. The holographic interference image of the fuel spray was recorded on the holographic plate using a pulsed Nd:YAG laser. The three dimensional images of the spray droplets were reconstructed using a CW Nd:YAG laser and were observed by a microscope CCD camera. To measure the size and the location of the reconstructed spray droplets in a short period of time, an automatic measurement system was developed. The spatial distribution of the droplet size was obtained within 10 minutes by analyzing the reconstructed image with this system. The measurement system was applied to the spray injected by a D.I. gasoline injector.

Key words: Spray, Droplet Size Distribution, Sauter Mean Diameter, Holography, Laser Diagnostics, Gasoline Engine, Direct Injection

1. はじめに

液体燃料を燃焼室内に直接噴射し、微粒化、蒸発、混合気形成などの過程を経て燃焼させる噴霧燃焼においては、燃料の微粒化過程が燃焼に重要な影響を及ぼす。たとえば、ディーゼル機関、筒内直噴ガソリン機関、ガスタービン燃焼器などにおいては、使用するインジェクターのタイプや噴射条件、雰囲気条件などの変化によって燃焼室内における燃料の微粒化状態が変化し、その結果、噴霧特性、燃焼特性が大きく異なってくる。したがって、このような機関における高効率・低公害な燃焼技術の開発のためには、燃料の微粒化過程や噴霧特性の研究が重要である。

噴霧特性の中で液滴径はもっとも基本的な評価項目であり、これまでも液浸法、フランホーフ折法、イメージ法、フェーズドップラー法など⁽¹⁾いろいろな方法が開発されている。これら種々の液滴径の測定法と比べ、ホログラフィー法は瞬時の噴霧の三次元情報が得られることから、液滴径やその空間分布といった噴霧の内部構造を解析する手段として非常に有効である^{(2)~(9)}。

しかし、従来、ホログラフィー法において三次元的に再生された画像の解析には多大な時間と労力を要し、ホログラフィー法を噴霧特性の評価に用いる場合の大きな障害となっていた。そこで、本研究では、噴霧液滴群のホログラフィー再生像における液滴画像の焦点位置と直径を自動計測するシステムを開発し、噴霧の液滴径の三次元分布を比較的短時間に測定することを試みた。本報告では、本研究で開発したホログラフィー再生像の自動計測システムの性能を評価した結果、および本システムを直噴ガソリンエンジンのインジェクターから噴射された噴霧に適用し、噴霧液滴の直径と体積濃度の空間分布を測定した結果について述べる。

2. 実験方法および装置

2.1 オフアキスホログラフィー法の概要

ホログラフィー法とは撮影対象の三次元的な情報を記録、再生できる一種の写真技術である⁽¹⁰⁾。これまで噴霧や微粒子のホログラフィー撮影には物体光が参照光の役割も兼ねたインライン方式^{(7)~(9)}か、参照光を物体光とは別の光路にとったオフアキス方式が用いられてきた^{(2)~(6)}。本

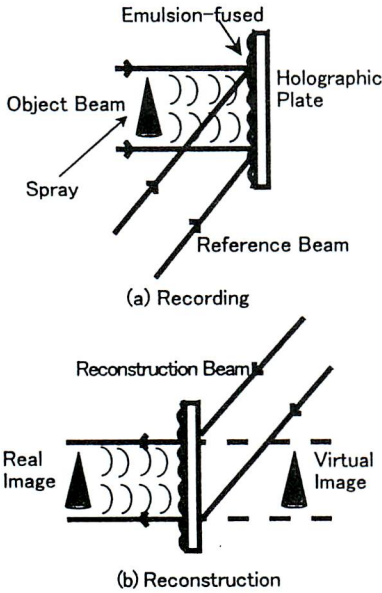


Fig. 1 Recording and Reconstruction of Off-Axis Holography

研究ではインライン方式に比べて光学系は複雑であるが、参照光が噴霧や霧困気によって乱されず比較的鮮明な再生像が得られるオフ軸方式を採用した。

図1にオフ軸方式のホログラフイーの記録と再生について示す。図1(a)に示すように記録の際にはパルスレーザーをビームスプリッターにより物体光と参照光の2つに分け、物体光は噴霧を通し、参照光は別の光路から撮影対象通過後の物体光と交差するように導く。物体光と参照光の交差面に設置した写真乾板の感光乳剤面に、参照光と物体光の光波面の干渉縞を撮影する。これにより噴霧液滴群の三次元的な情報が記録される。この写真乾板を現像処理したホログラムから噴霧像を再生するときには、図1(b)のように撮影時の参照光の入射方向と正反対の方向から撮影時のレーザーと同波長の連続光のレーザーを照射する。この時、写真乾板上の干渉縞が回折格子の役割を果たし、撮影時に噴霧によって散乱された時と同一位相の光波面が再現され、撮影時の位置に噴霧の実像が再生される。

2.2 噴霧のホログラフイー記録と再生装置

図2と3に本研究で用いたホログラフイーの撮影用と再生用の装置の概略を示す。図2のホログラフイー撮影では、パルス YAG レーザ(日本科学エンジニアリング製、波長 532nm, 出力 15mJ, パルス幅 20~30ns)からのビームをスペイシャルフィルターに通してビーム内の光強度を均一にした後、ビームスプリッターで2つに分け、物体光は噴霧を通し、参照光は斜め 45 度の方向から写真乾板 (AGFA

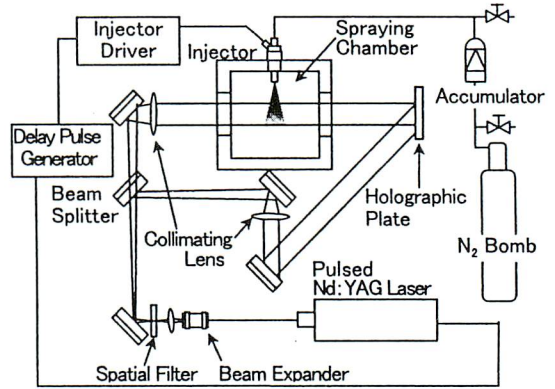


Fig. 2 Experimental Apparatus for Recording of Hologram

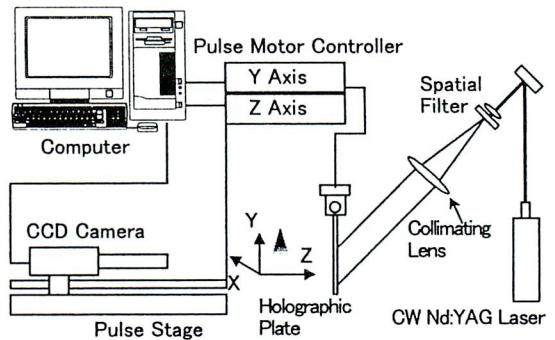


Fig. 3 Experimental Apparatus for Reconstruction of Hologram

製, 8E56)に照射した。撮影領域はインジェクター先端部から下方 50mm の位置の約 30mm の円筒状領域である。

噴射圧力は窒素ポンペの圧力をニードルバルブにより調整してアキュムレーターに導いて設定した。噴射液体にはガソリンに比べると蒸発しにくく、粘性係数や表面張力などの微粒化に影響する物性値がガソリンとほぼ同じドライソルベントを用いた。噴射期間と撮影タイミングはディレイパルスジェネレータ(Stanford Research Systems 製, DG535)にて操作した。

一方、図3のホログラフイー再生では連続光の YAG レーザ(日本科学エンジニアリング製、波長 532nm, 出力 5mw)からのビームをスペイシャルフィルターに通してビーム内の光強度を均一にした後、写真乾板に対し撮影時の参照光の入射方向と正反対の方向から照射する。そうすると撮影時と同じ位置に噴霧像が再生されるので、その像に対しズーム鏡筒(清和光学製, MS101)付き CCD カメラ(SONY 製, XC-003, 画素数 768×494)を、モータ付きパルスステージ(日本科学エンジニアリング製 PC101)を使って Z 軸(奥行)方向に動かしつつ画像を取り込む。さらに Y 軸(上下)方向の位置を変えてはまた Z 軸方向にカメラを動かしその画像を取り込んだ。

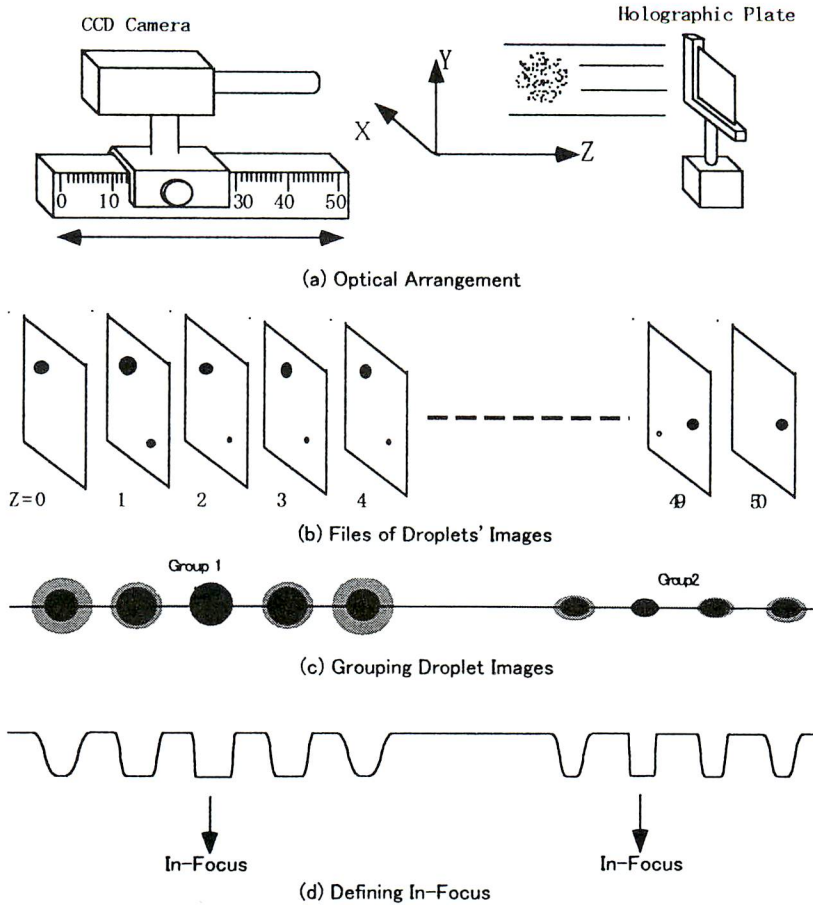


Fig. 4 Procedure of In-Focus Droplet Measurement

3. ホログラフィー再生噴霧像の自動計測システムの開発

直噴ガソリンインジェクターの噴霧のように数密度が高い噴霧では、マニュアル処理によって全ての液滴の焦点を判断して液滴の位置と直径を計測するには膨大な時間と労力を要してしまう。そこで、画面内の噴霧液滴群に対して個々の液滴の位置と直径を求める自動計測処理プログラムを開発し、噴霧のホログラフィー再生像の解析を行うことにした。

3.1 自動計測処理の流れ

噴霧液滴の位置と直径の自動計測処理の流れを図4に示す。コンピュータにて全装置を制御し、Z軸方向50mmにわたり1mmづつカメラを移動して(図4(a))、画像処理ソフト(Media Cybernetics製、Image-Pro)による画像データ取得とファイル保存を繰り返し行う(図4(b))。全画像データを取得した後、近接する複数の画像においてX,Y座標

が同じ液滴を同一液滴とみなす(図4(c))。同一液滴と判定された画像群の中で、輪郭の画像濃度勾配が最も急になっている画像を焦点の合っている画像とする(図4(d))。この手順により液滴画像の焦点を判断し、噴霧液滴の位置と直径を計測する。

3.2 自動計測システムの性能評価

自動計測システムの性能評価を以下のようにして行った。

3.2.1 位置の計測精度 自動計測による位置の計測精度を検討するため、径の異なる3本のワイヤーを画像が重ならないように、図2の噴霧容器内の中心と左右の窓側に配置してホログラフィー撮影を行なった。そして、ホログラフィー再生像に対し自動計測処理を行い、求めた位置と大きさを実際の値と比較した。その結果を図5に示す。図中の()内の数字はY,Z座標を、その右側の数字はワイヤー直径を示し、上段が実際に設定した値、下段が測定値である。ワイヤーのY,Z座標は中心のワイヤーを基準

基準として表示しており、左右のワイヤー位置の誤差は最大 8% 程度である。また、ワイヤー直径の誤差は最大 0.7% と良好である。

3. 2. 2 粒径の計測精度 図 6 に噴霧液滴群のホログラフィー再生像のコンピューターモニター画面上における画像の一例を示す。ガソリン機関用のポート噴射インジェクターから噴射圧力 0.22MPa、雰囲気圧力 0.1MPa の条件で噴射した時の噴霧液滴群の一部である。実際の噴霧へ適用した際の精度を検討するため、このように噴霧液滴が少なくかつ大きいために再生像が比較的鮮明な画像を計測対象とし、マニュアル処理によって焦点を判断した場合と自動計測した場合の計測結果を比較した。その結果を図 7 と 8 に示す。図 7 は計測した Z 軸方向 50mm の中で噴霧液滴が集中している領域の三次元分布図を示しており、格子間隔は 5mm である。マニュアル処理(図 7(a))と自動計測(図 7(b))による噴霧液滴群の三次元分布は類似した分布となっている。図 8 は噴霧液滴群の粒度分布とザウタ平均粒径(SMD)を求めた結果である。両者はほとんど一致している。

次に、直噴ガソリンインジェクターの噴霧のように微細かつ多数の噴霧液滴に対する適用性を、粒子画像が噴霧液滴群の画像に類似しているレチクルを用いて検討した。

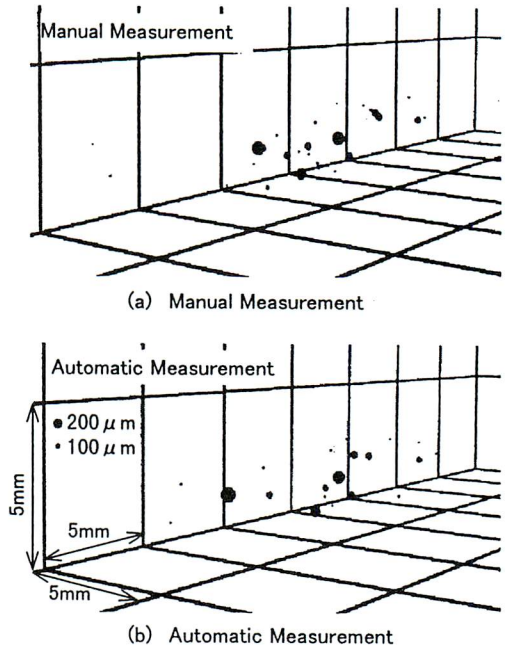


Fig. 7 Spatial Distributions of Droplets Obtained by Manual and Automatic Measurement

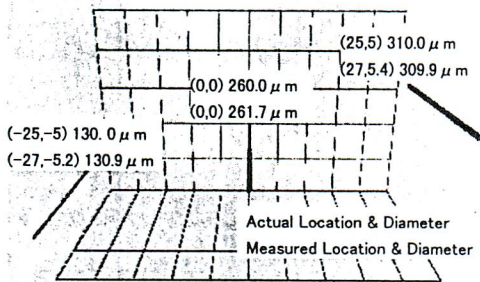


Fig. 5 Comparison of Actual and Measured Location and Diameter of Wires

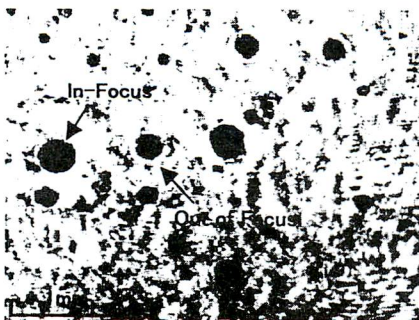


Fig. 6 Reconstructed Image of Droplets Injected by Port Injector for Gasoline Engine

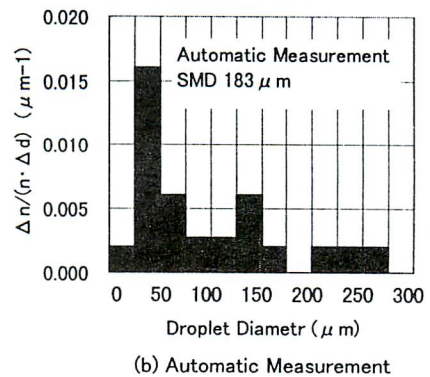
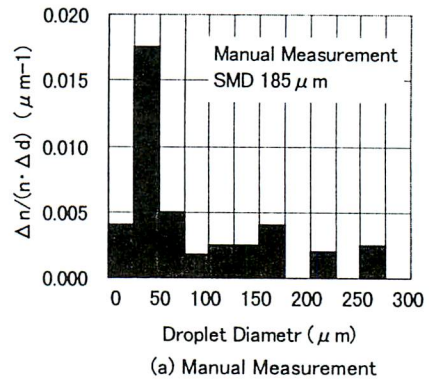


Fig. 8 Droplet Size Distributions and SMD Obtained by Manual and Automatic Measurement

レチクルとは、ガラス基板にクロムの薄膜でできた不透明な円盤が、不規則に重ならないように敷き詰められたものである⁽¹¹⁾。このレチクルを図2の噴霧容器の中心に物体光と直角に置いてホログラフィー撮影をし、得られた図9の再生像に対して自動計測処理を行った。

まず、これまでより微細な粒子を取り扱うので、画像の空間分解能をあげるため、画像を取り込む際の CCD カメラの倍率設定を検討した。図10に CCD カメラの倍率を上げて単位長さ当たりの画像ピクセル数を 0.15 ピクセル/ μm (図10(a))から 0.30 ピクセル/ μm (図10(b))にした場合の粒度分布を示す。CCD カメラの倍率を上げることによって空間分解能が高まり、小さな粒子が観測できるようになる。その結果、粒度分布の重心が小粒径側に移っている。次に、CCD カメラの倍率を上げて単位長さ当たりの画像ピクセル数を増やしたときのザウタ平均粒径と最小粒径の変化を図11に示す。ザウタ平均粒径にはほとんど変化が見られないものの、最小粒径は 0.30 ピクセル/ μm 辺りまで減少しているが、その後の減少は小さい。従って、CCD カメラの倍率を 0.30 ピクセル/ μm に設定することで、レチクル程度の粒子群の計測における空間分解能は十分確保できると判断し、この設定で直噴ガソリンインジェクターからの噴霧画像を計測することにした。

3.2.3 他の計測法との比較 このように画像の空間分解能を確保した上で、ホログラム撮影で得られたレチクルの再生像に対して自動計測処理を行ない、他の計測法による結果、すなわち顕微鏡画像計測とフランホーファ回折を利用した粒径測定装置(MALVERN 製, 2600 Series)による結果と比較した。図12に粒度分布とザウタ平均粒径の比較を示す。顕微鏡画像計測(図12(a))と比較すると、フランホーファ回折法による粒度分布(図12(b))では大きな粒径が検出されず、その結果、ザウタ平均粒径も 13%小さくなっている。これはレチクルではガラス基板上の二次元の円盤からの回折パターンとなり、これが実際の液滴のような三次元形状の粒子の回折パターンと異なるためと考えられる⁽¹¹⁾。

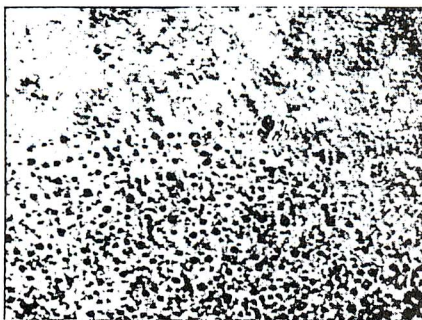


Fig. 9 Reconstructed Image of Reticle

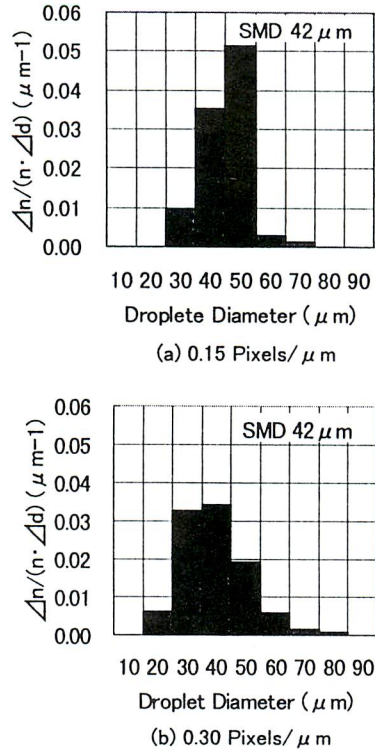


Fig. 10 Comparison of Droplet Size Distribution between Two CCD Camera Magnifications

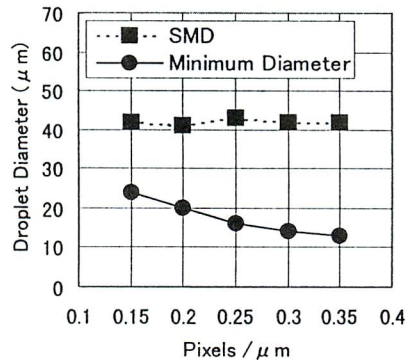


Fig. 11 Effect of CCD Camera Magnification on SMD and Minimum Diameter

一方、ホログラフィーで自動計測した粒度分布(図12(c))は、顕微鏡画像計測とは完全に一致はしていないものの、フランホーファ回折法よりは大きな粒径が検出されている。また、ザウタ平均粒径は顕微鏡画像計測より小さいが、その差は 8.5%であり、フランホーファ回折法より顕微鏡画像計測の結果に近づいている。

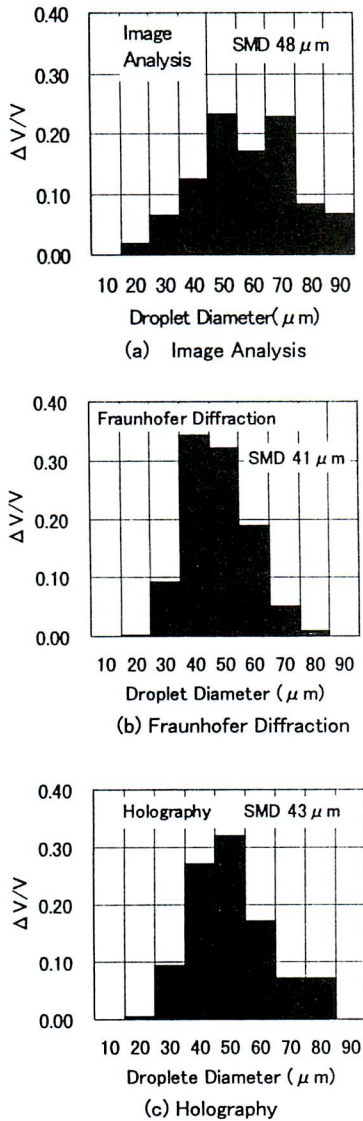


Fig. 12 Comparison of Droplet Size Distributions among Holography and Other Measurement Methods

以上のようにワイヤー、比較的大粒径で数密度の小さい噴霧液滴群、レチクルを用いてホログラフィー再生噴霧像の自動計測システムの性能評価を行った結果、本システムは直噴ガソリンインジェクターからの噴霧のように比較的小粒径の液滴群の空間分布、粒度分布、ザウタ平均粒径の解析に対して、十分な性能を持っていると判断できる。そこで次に、直噴ガソリンインジェクターからの噴霧を本システムで計測した。

4. 直噴ガソリンインジェクターからの噴霧計測の結果

4. 1 供試インジェクター仕様と実験条件

本研究に供試した直噴ガソリンインジェクターの仕様ならびに実験条件を表1に示す。インジェクターは直噴ガソリンエンジンで一般的に用いられているスワールタイプのインジェクターである^{(12), (13)}。燃料の噴射圧力は 5MPa, 雰囲気圧力は 0.1MPa である。ホログラフィー撮影は噴射開始 1.8ms 後に行い、図13 に示すようなインジェクターの先端部から 50mm の位置で、高さ 10mm×幅 2mm×奥行き 50mm の領域に存在する噴霧液滴群の測定を行った。

4. 2 噴霧液滴の三次元分布, 粒度分布, ザウタ平均粒径

図 14 に計測領域全体における粒度分布とザウタ平均粒径を、フランホーファー回折法の計測結果とあわせて示す。両計測法とも粒度分布はいずれも 50~60 μm にピークを持っており、ザウタ平均粒径の値もほぼ一致している。このことから、直噴ガソリンインジェクターからの噴霧の測定においても十分な精度があると考えられる。

次にホログラフィーによる噴霧液滴の位置と直径の計測結果をもとに、三次元レンダリングソフトにより描いたものを図 15 に示す。X,Y,Z 軸の格子間隔は 5mm で、噴霧液滴につ

Table 1 Injector Type and Test Condition

Injector Type	Swirl Injector
Flow Rate	15mm ³ /ms
Fuel Pressure	5MPa
Injection Quantity	9mm ³ /stroke
Ambient Pressure	0.1MPa
Laser Firing Time	1.8ms from Start of Injection

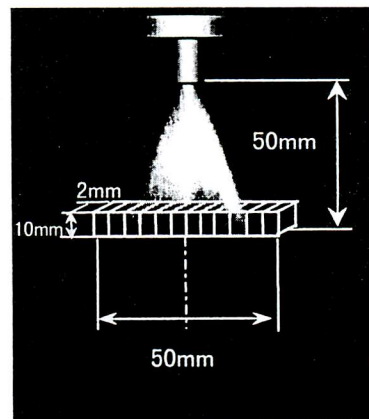
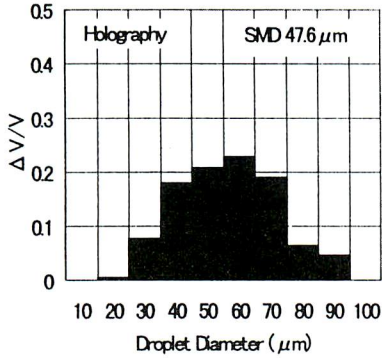
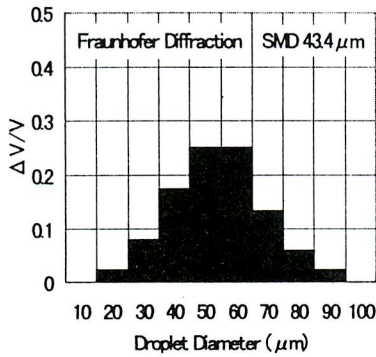


Fig. 13 Measurement Volume



(a) Holography



(b) Fraunhofer Diffraction

Fig. 14 Comparison of Droplet Size Distribution between Holography and Fraunhofer Diffraction

いは見易いようにスケールを 10 倍にして表示している。

また、図 16 に格子間隔 5mm ごとのザウタ平均粒径と体積分布を示す。この図では噴霧の中心が横軸 25mm の位置としている。噴霧の体積分布は中心部の密度が薄い中空円錐噴霧であることが定量的に把握できる。さらに、その噴霧のザウタ平均粒径は中心部が小さく周辺部が大きい傾向を示している。これは中空円錐噴霧の内部の圧力が下がるため、微細な粒子が圧力差による流動で中心方向に移動したためと思われる。

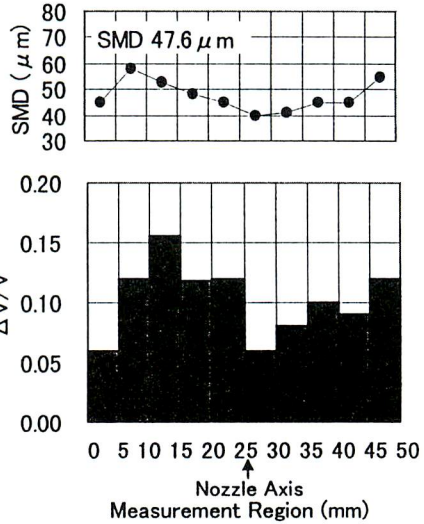


Fig. 16 Spatial Distributions of SMD and Droplet Volume

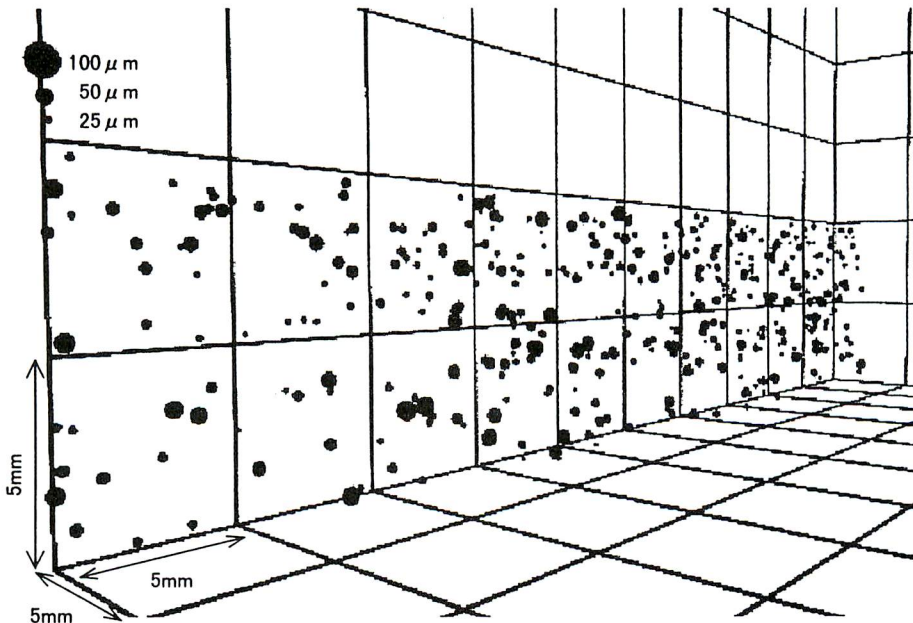


Fig. 15 3-D Rendering Image of DI Gasoline Spray

5. 結論

パルスレーザーホログラフィー法による噴霧撮影とホログラフィー再生像の自動計測システムを直噴ガソリンエンジンのインジェクターから噴射された噴霧に適用した。噴霧粒径の三次元計測に関して得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) ホログラフィー法によって再生された噴霧像の自動計測システムは、位置の精度についてはワイヤーを用いた検証で誤差は最大 8%、液滴径の精度についてはポート噴射インジェクターを用いた検証で、マニュアル計測により求めたザウタ平均粒径との差が 1% である。さらに直噴ガソリンインジェクターの噴霧と同レベルの微細で多数の円盤が分布するレチクルのザウタ平均粒径を本計測システムを用いて測定した結果と直接画像から計測した結果を比較すると誤差は最大 8.5% である。
- (2) 本計測システムを直噴ガソリンインジェクターからの噴霧に適用し、計測領域内の粒度分布とザウタ平均粒径を求めた結果、レーザー回折法による計測値とほぼ一致する。
- (3) 直噴ガソリンインジェクターの噴霧は、中心部に噴霧が少なく周辺部に噴霧が多い中空円錐噴霧の形態であることを、実際に噴霧が存在している空間で定量的に把握できた。また、その中空円錐噴霧内のザウタ平均粒径は、噴霧中心が外周部より小さくなっている。

謝辞

本研究で開発したホログラフィー計測装置の一部は、宇宙環境利用フロンティア共同研究の一環として製作されたものである。記して感謝の意を表します。

文 献

- (1) 日本液体微粒化学会：噴霧特性の測定原理と実習テキスト，第7回微粒化フォーラム(1999)，23-85
- (2) 西田恵哉，村上直樹，廣安博之：高温・高圧下におけるディーゼル噴霧のホログラフィー計測，日本機械学会論文集，52 卷，474 号(1986)，2457-2463。
- (3) 西田恵哉，村上直樹，廣安博之：ホログラフィー再生像の画像解析によるディーゼル噴霧内燃料蒸気濃度の計測，日本機械学会論文集，53 卷，488 号(1987)，1487-1495。
- (4) 西田恵哉，高須賀祥隆，廣安博之：ホログラフィー再生像の画像解析によるディーゼル噴霧内燃料蒸気濃度の計測(第 2 報 高温・高圧下の結果)，日本機械学会論文集，54 卷，497 号(1988)，203-210。
- (5) 谷重亮介，吉崎拓男，西田恵哉，廣安博之，小山正人：パルスレーザーホログラフィー法を用いた微小重力下における3次元噴霧粒径測定，日本マイクログラビティ応用学会誌，Vol.15, No.2(1998)，61-70。
- (6) Trolinger, J. D. : Holographic Interferometry as a Diagnostics Tool for Reactive Flows, Combustion Science and Technology, Vol.13(1976), 229~244.
- (7) Jones, A.R., Sarjeant, M., Denham, R.O. : Application of In-line Holography to Drop Size Measurement in Dense Fuel Sprays, Applied Optics, Vol.17, No.3(1978), 328~330.
- (8) 森山敏尚，小町祐一，梶山康一，茂呂則夫，狩野覚，横田英嗣：パルスレーザーホログラフィによる高圧力下の燃料噴霧の計測，東海大学紀要工学部，No.2(1980)，179~187。
- (9) 石川宗晴，村上昭年：レーザーによる噴霧流の画像計測，日本航空宇宙学会誌，Vol.30, No.342(1982)，21~26
- (10) 村田和美：ホログラフィー入門，朝倉書店(1972)，1-7。
- (11) (社)日本機械学会研究協力部会：RC145 微粒子のキャラクターゼーションに関する調査・研究分科会研究報告書(1998)，253-260。
- (12) 古谷雄三：筒内ガソリン噴射用インジェクタの研究，ゼクセルテックレビュー，第 11 号(1995)，1-18。
- (13) 山下洋幸，丸原正志，太田統之，工藤秀俊，山本博之：筒内噴射ガソリンエンジンの混合気形成，自動車技術会学術講演前刷集，976(1997)，5-8。



山川 正尚
広島大学大学院工学研究科
〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1
Tel. (0824) 24-7566
Fax. (0824) 22-7034

略歴:1986 年東北大学工学部精密工学科卒業. 同年マツダ(株)入社. 現在, 広島大学大学院工学研究科博士課程に在学. 直噴ガソリンエンジンにおける燃料噴霧の混合気形成と燃焼に関する研究に従事.



廣安 博之
近畿大学工学部 教授
〒739-2116
東広島市高屋うめの辺 1
Tel. (0824) 34-7000
Fax. (0824) 34-7011

略歴:1962 年東北大学大学院博士課程修士後, (株)豊田中央研究所を経て, 1969 年より広島大学教授, 1997 年広島大学名誉教授. 主として, 内燃機関の燃焼, 噴霧燃焼に関する研究に従事.



上川 将洋
(株)新潟鐵工所
〒144-8639
東京都大田区蒲田本町 1-10-1
Tel. (03) 5710-7700
Fax. (03) 5710-4750

略歴:1999 年広島大学大学院工学研究科博士課程(前期)終了. 同年(株)新潟鐵工所入社.



西田 恵哉
広島大学工学部 助教授
〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1
Tel. (0824) 24-7562
Fax. (0824) 22-7034

略歴:1980 年広島大学大学院工学研究科博士課程(前期)終了. (株)クボタを経て広島大学工学部助手, 1990 年より現職. 1995 年 10 月より 10 ヶ月, 米国ミシガン大学客員研究員. 広島大学燃焼工学研究室において噴霧のレーザー応用・画像計測, 微粒化機構, ディーゼル噴霧, エンジン内混合気形成に関する研究に従事.



吉崎 拓男
広島大学工学部 助手
〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1
Tel. (0824) 24-7566
Fax. (0824) 22-7034

略歴:東京理科大学大学院修士課程終了後, マツダ(株)を経て, 1991 年より現職. 噴霧のレーザー応用・画像計測, ディーゼル噴霧の混合気形成過程に関する研究に従事.